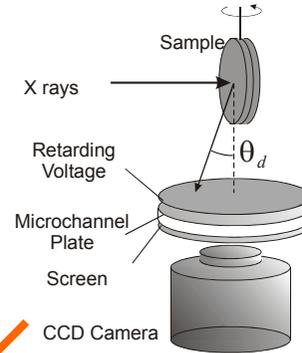
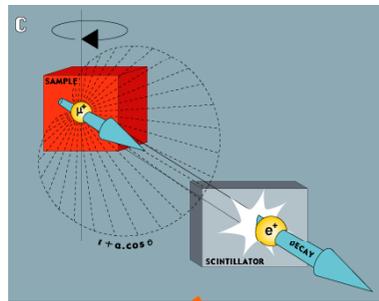


表面・界面部門プロジェクト

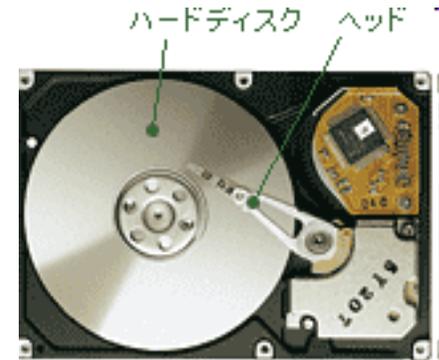
磁性薄膜・多層膜の表面・界面における, 原子構造・磁気状態および電子状態の解明

プロジェクトリーダー: 雨宮健太 (物構研放射光・CMRC)

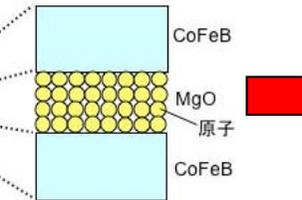
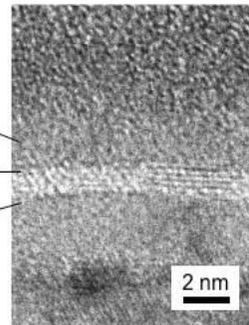
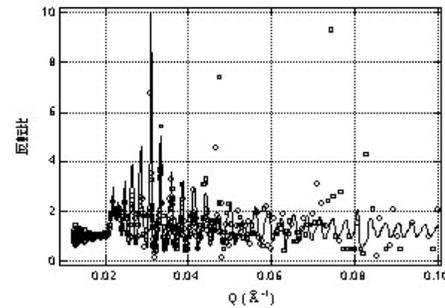
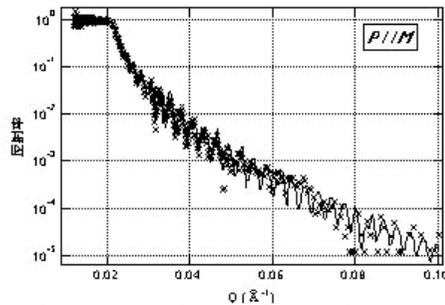
(超低速)ミュオンSR



深さ分解
XAFS/XMCD



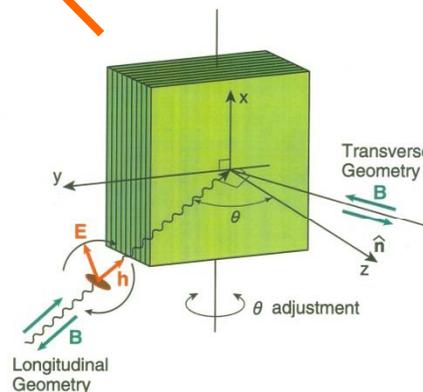
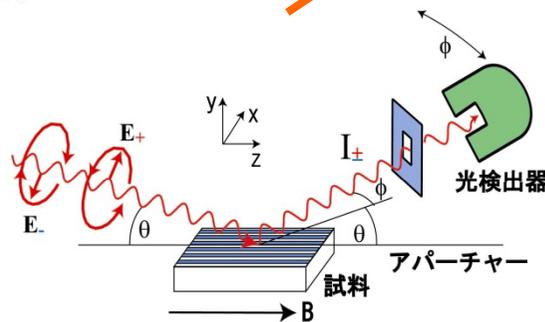
中性子反射率



Spintronics Devices

Magnetic Readout
High speed & sensitivity
Magnetic RAM
High speed, non volatile

共鳴磁気散乱

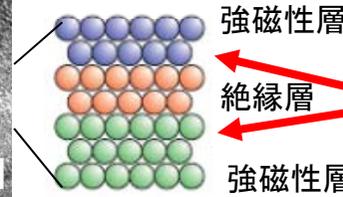
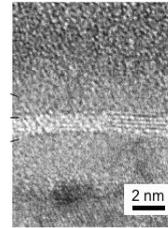
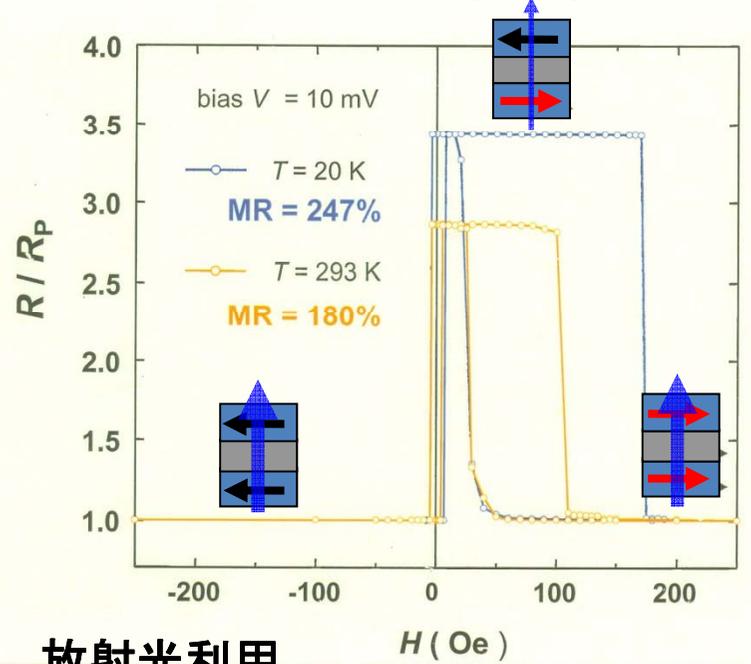


配置・角度依存
XMCD/XMLD

研究のターゲットと現状

磁性薄膜の表面・界面における, 結晶構造, 電子状態, 磁気状態の決定

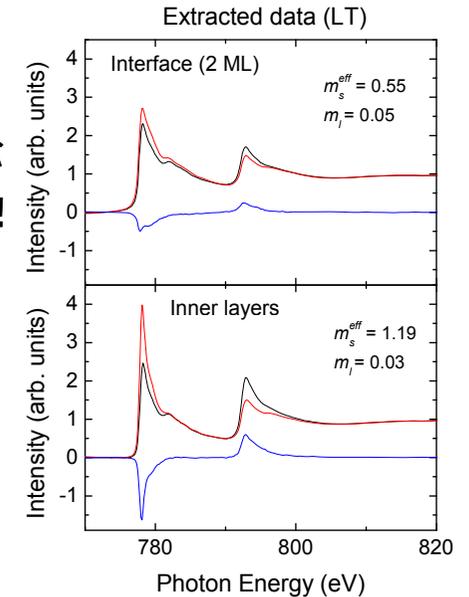
例: トンネル磁気抵抗(TMR)素子



ここが重要!

界面層は内部層と大きく異なる化学状態, 磁気状態(磁化が小さい)
⇒ 性能の低下の原因

作製法の工夫で界面を制御
⇒ より高性能なTMR材料を開発



放射光利用

- ・配置・角度依存XMCD (5 T, 5 K)
- ・深さ分解XMCD
- ・偏光スイッチング ⇒ 利用開始
- ・簡易XMCD (1.2 T, 30 K) ⇒ 定常運転

中性子利用

- ・偏極中性子反射率(J-PARC BL-17)
- ⇒ 定期的に実験を実施

ミュオン利用

- ・超低速ミュオン利用へ向けて準備中

2012年度の主な成果

- ホイスラー合金/MgO界面: S.Tsunegi, K.Amemiya, M.Sakamaki et al., Phys. Rev. B, 85 (2012) 180408(R).
- Ga⁺照射Pt/Co/Ptにおける垂直磁化発現: M.Sakamaki, K.Amemiya et al., Phys. Rev. B 86 (2012) 024418.
- ホイスラー合金/MgO界面磁性の組成依存性: V.R.Singh, A.Fujimori et al., Phys. Rev. B 86 (2012) 144412.
- Fe/Ni薄膜の構造と磁気異方性: M.Sakamaki and K.Amemiya, Phys. Rev. B 87 (2013) 014428.

最近の成果から

(1) FeNi多層膜の構造と磁気異方性

(2) Pt/Co/Pt薄膜へのGa⁺打ち込みによる面直磁化発現

現在進行しつつあるテーマ

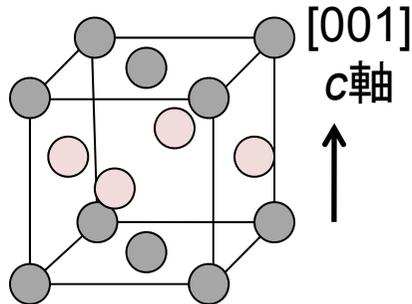
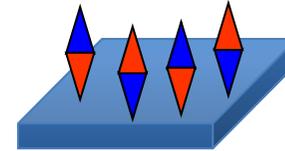
反強磁性FeMnと強磁性Niの界面磁気異方性

L1₀型規則合金における垂直磁気異方性

磁気記録媒体の設計

$$\frac{K_u V}{k_B T}$$

K_u : 磁気異方性定数 V : 体積
 k_B : ボルツマン定数 T : 温度



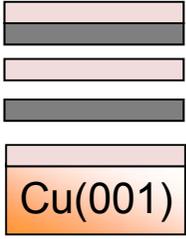
L1₀型規則合金: Fe-Pt

$K_u = 3.0 \times 10^7$ (erg/cm³) **強い垂直磁気異方性**

T. Shima et al., Appl. Phys. Lett. **80**, 288 (2002)

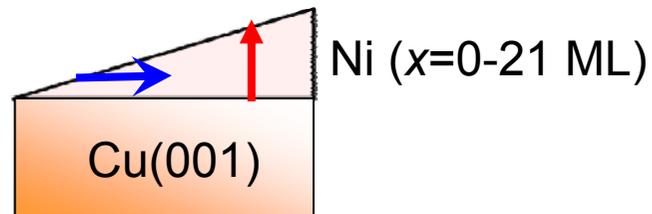
レアメタル代替材料: Fe-Niにおいて実現できないか?

K_u を大きくするには
 規則度の向上
 歪みの制御
 界面の影響


 FeNi薄膜成長過程の観察
 表面構造
 ⇒ RHEED
 Fe, Ni各層の磁気異方性
 ⇒ XMCD

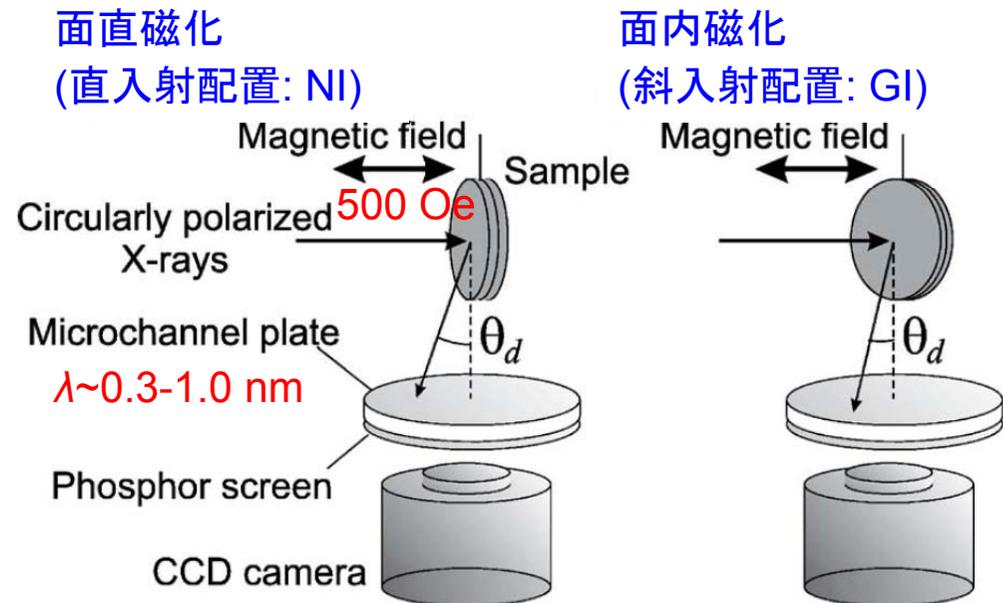
試料作製と測定

試料作製と測定: PF BL-7A, 16Aにおいて同じ超高真空チェンバーで行った
室温でNiとFeロッドを電子衝撃加熱し膜蒸着
蒸着レートはあらかじめRHEEDで確認



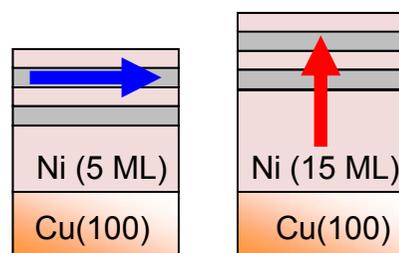
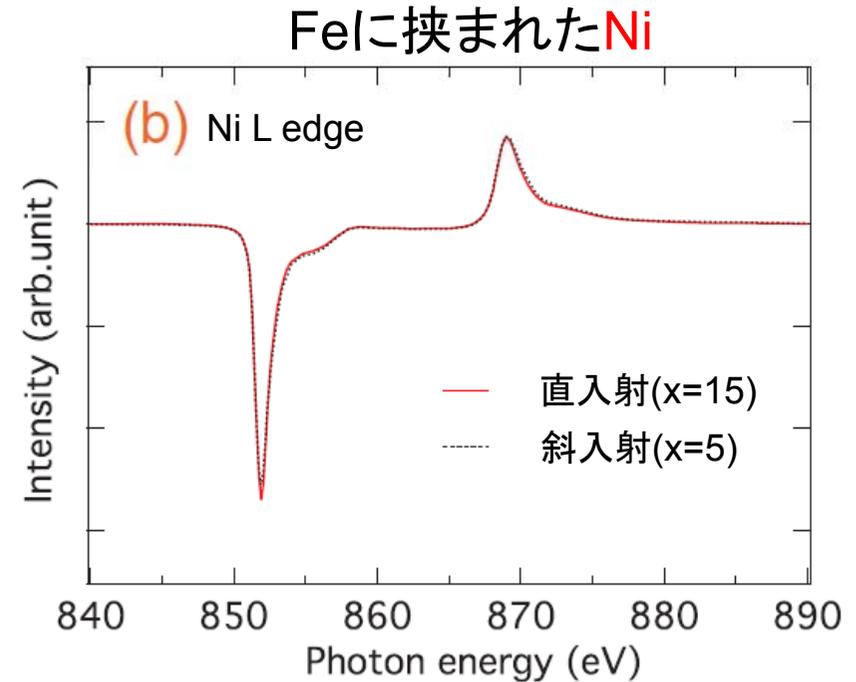
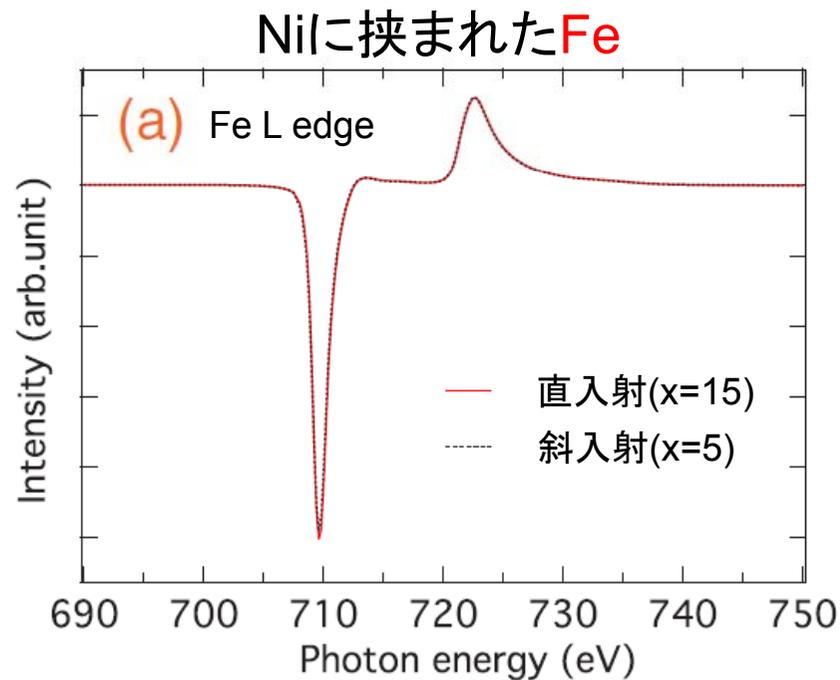
Ni/Cu(001):
~13MLから格子緩和が始まる
7-11 MLで面内から面直へ転移

⇒ 構造と磁性両方の制御が可能



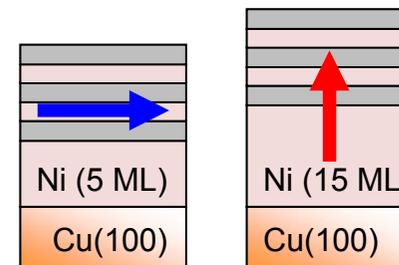
B. Shultz et al., PRB. **50** (1994) 13467.
W. L. O'Brien et al., PRB. **54** (1996) 9297.

FeおよびNiの磁気異方性のエネルギーの見積り



磁気異方性エネルギー
 $K_{\text{Fe}} = 10 \pm 40 \mu\text{eV}$

表面では $140 \pm 60 \mu\text{eV}$
 (強い面直志向)



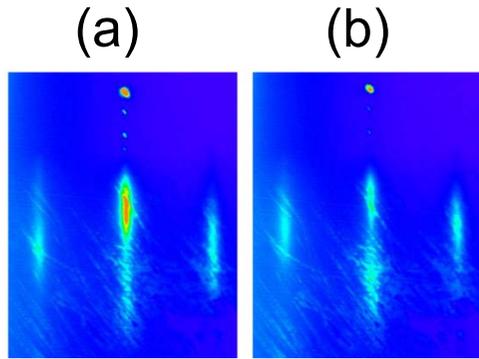
磁気異方性エネルギー
 $K_{\text{Ni}} = 60 \pm 30 \mu\text{eV}$

表面では $-30 \pm 20 \mu\text{eV}$

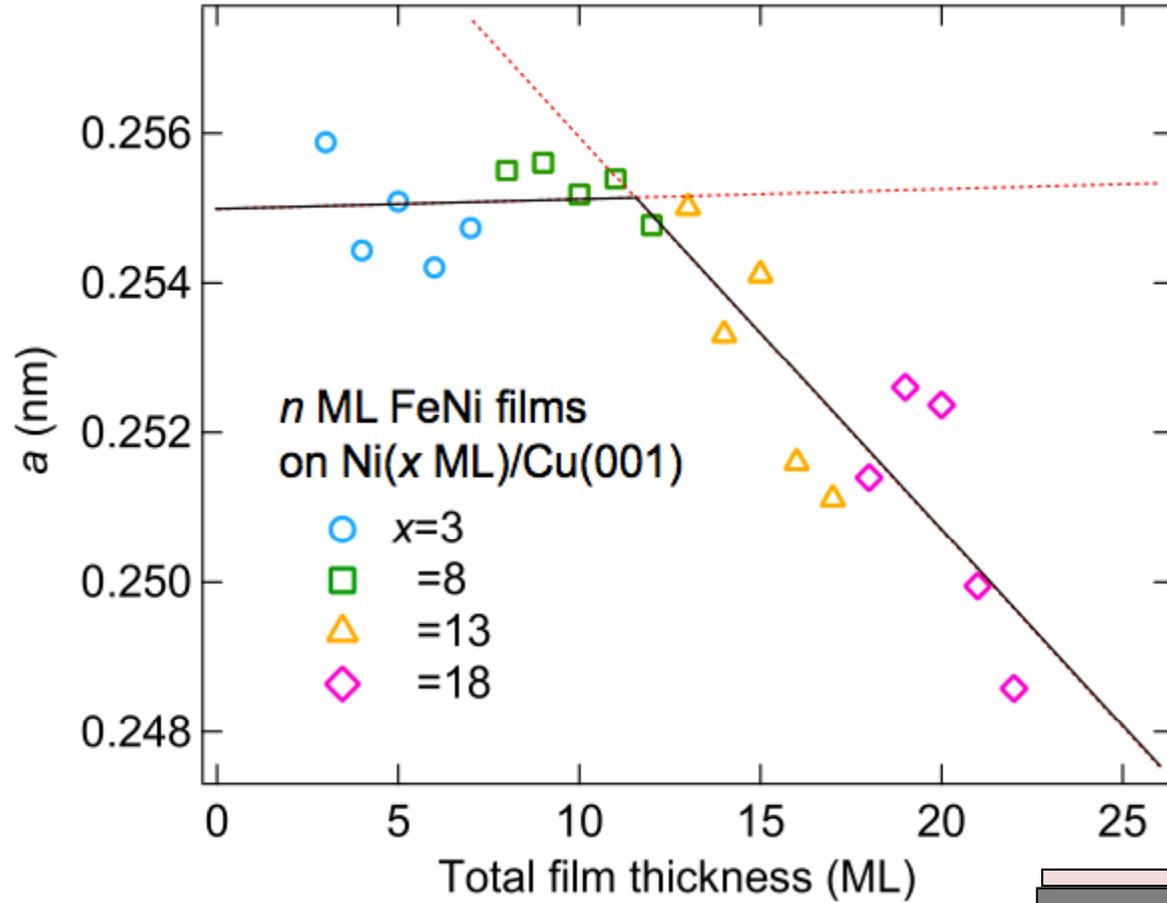
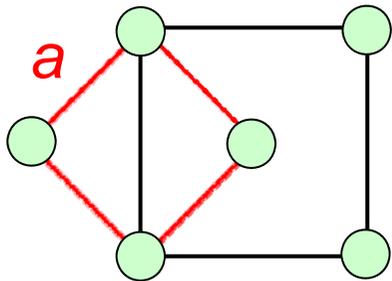
Feを表面と同じような環境におければ面直磁化に有利

M. Sakamaki and K. Amemiya, Appl. Phys. Express 4, 073002 (2011)

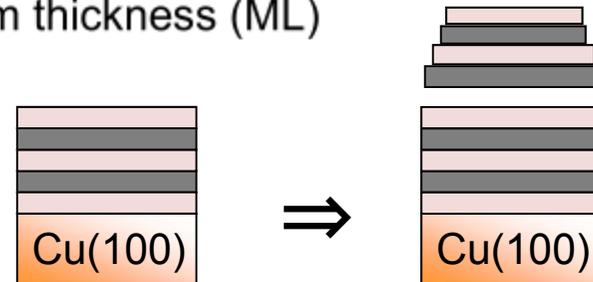
面内格子定数の厚さ依存性



(a) Ni(10 ML)/Cu(001)
 (b) 4 ML FeNi film on Ni(10 ML)/Cu(001)

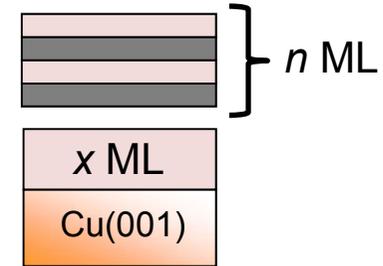


13MLまではCu基板の格子に整合した緩やかな変化
 厚い領域では急速に格子緩和



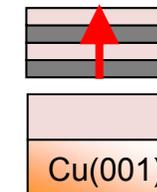
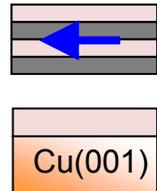
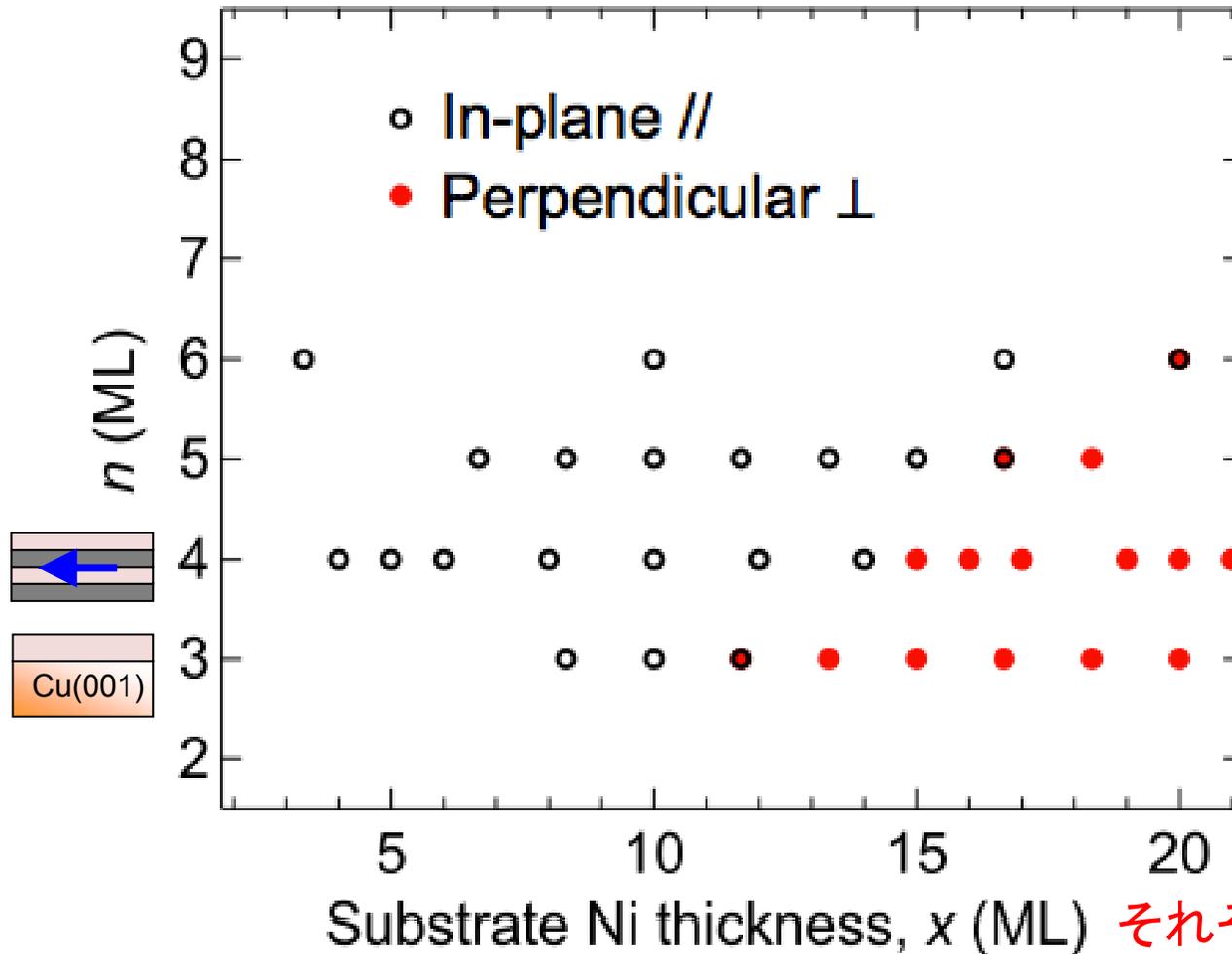
磁気相図

n ML FeNi films on Ni(x ML)/Cu(001)



下地Ni層厚い領域
で面直磁化示す

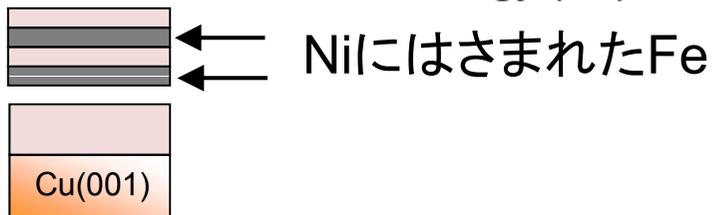
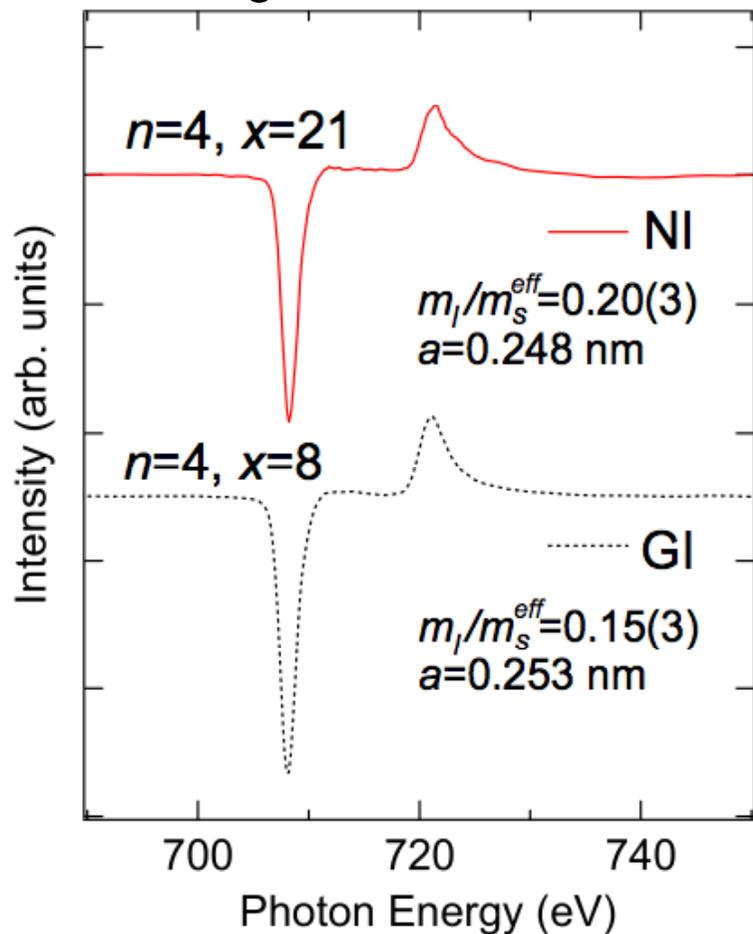
FeNi膜厚増えると
面内領域広がる



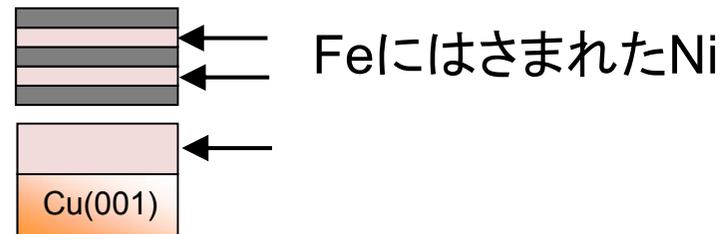
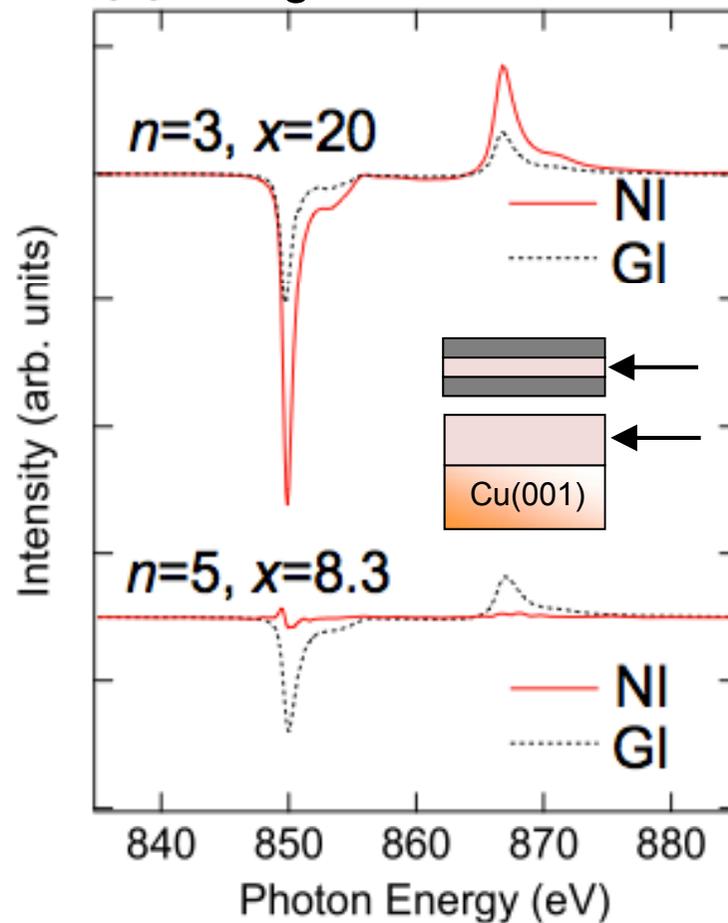
それぞれの点での磁気
モーメントと構造を調べた

Layer-resolved magnetic anisotropy analysis

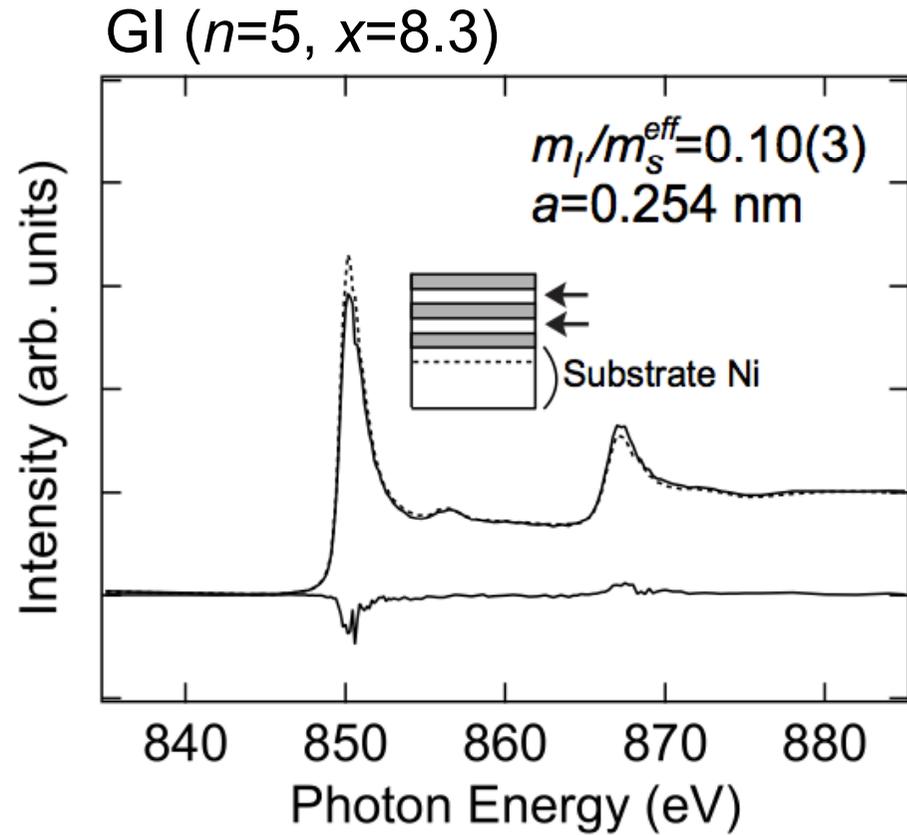
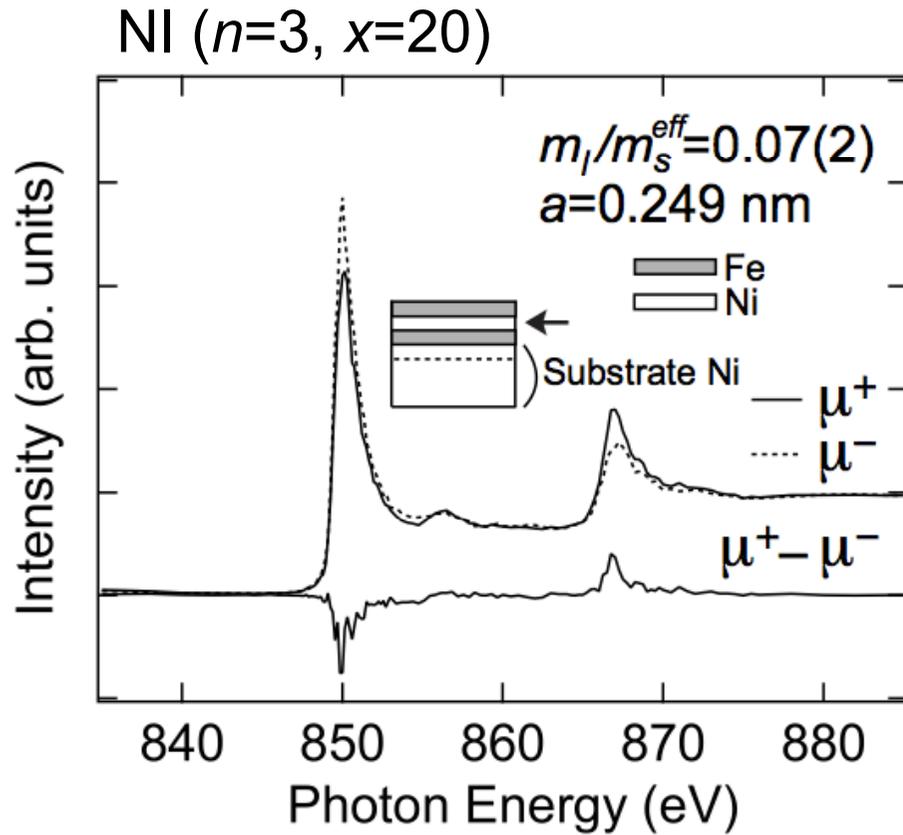
Fe L-edge XMCD



Ni L-edge XMCD

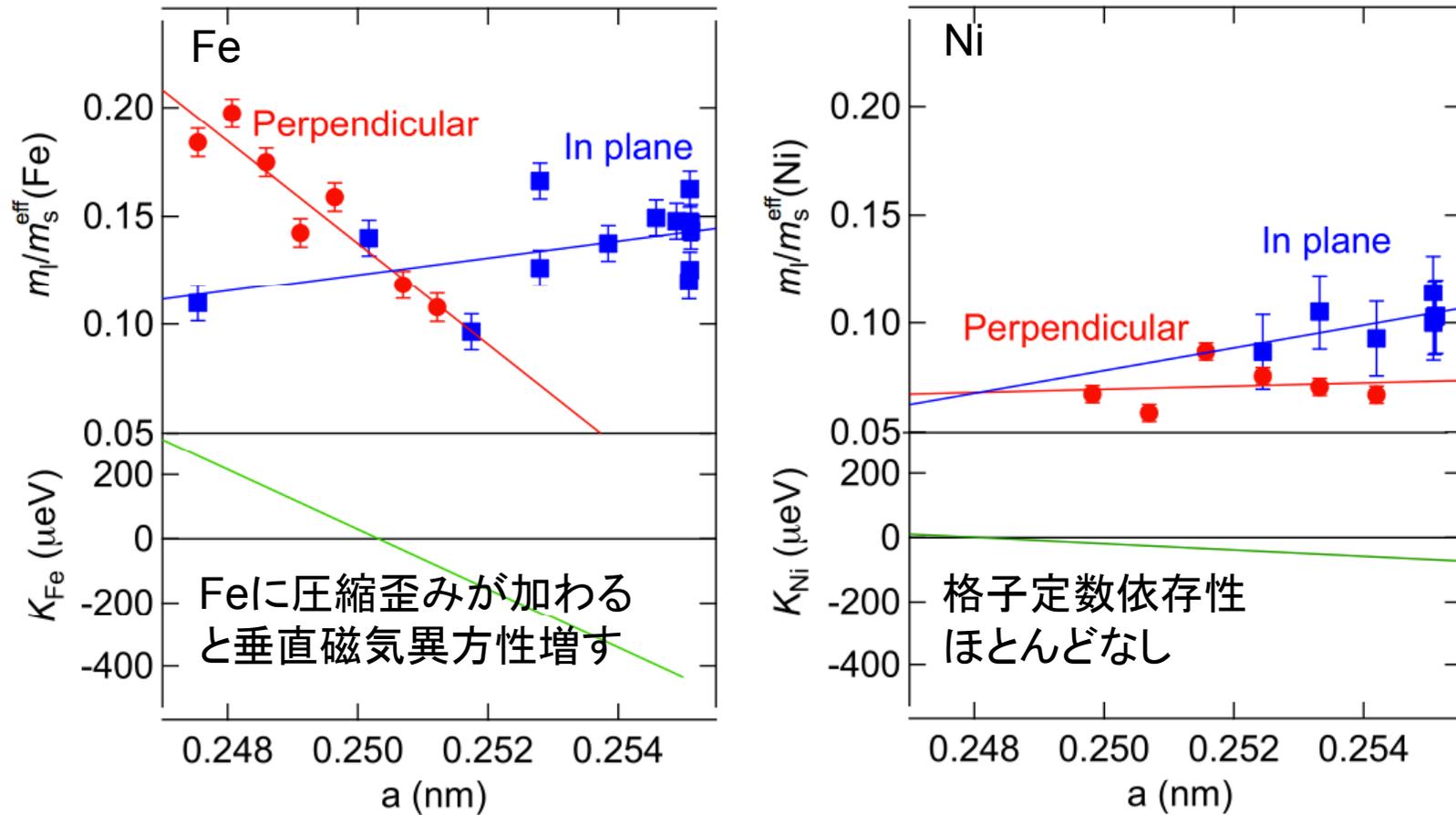


深さ分解XMCD法の適用によって抽出した Ni L-edge XMCD



格子歪みとFe/Ni界面の磁気異方性の関係

M. Sakamaki and K. Amemiya, Phys. Rev. B **87**, 014428 (2013).



磁気異方性エネルギー
(MAE)の見積り

$$K = \frac{\xi}{4} \frac{G}{H} \frac{\Delta m_l}{\mu_B} = F \cdot \Delta m_l$$

P. Bruno, PRB **39** (1989) R865.

W. Kuch et al., PRB **62** (2000) 3824 .

$$F_{\text{Fe}} = 2.0 \pm 0.8 \text{ meV}/\mu_B$$

$$m_{s(\text{Fe})}^{\text{eff}} = 1.6 \mu_B$$

$$F_{\text{Ni}} = 3.0 \pm 0.5 \text{ meV}/\mu_B$$

$$m_{s(\text{Ni})}^{\text{eff}} = 0.73 \mu_B$$

APEX **4** (2011) 073002.

格子歪みを利用した磁気異方性の制御

圧縮歪みによって
面直磁気異方性を増強させることに成功

最近の成果から

(1) FeNi多層膜の構造と磁気異方性

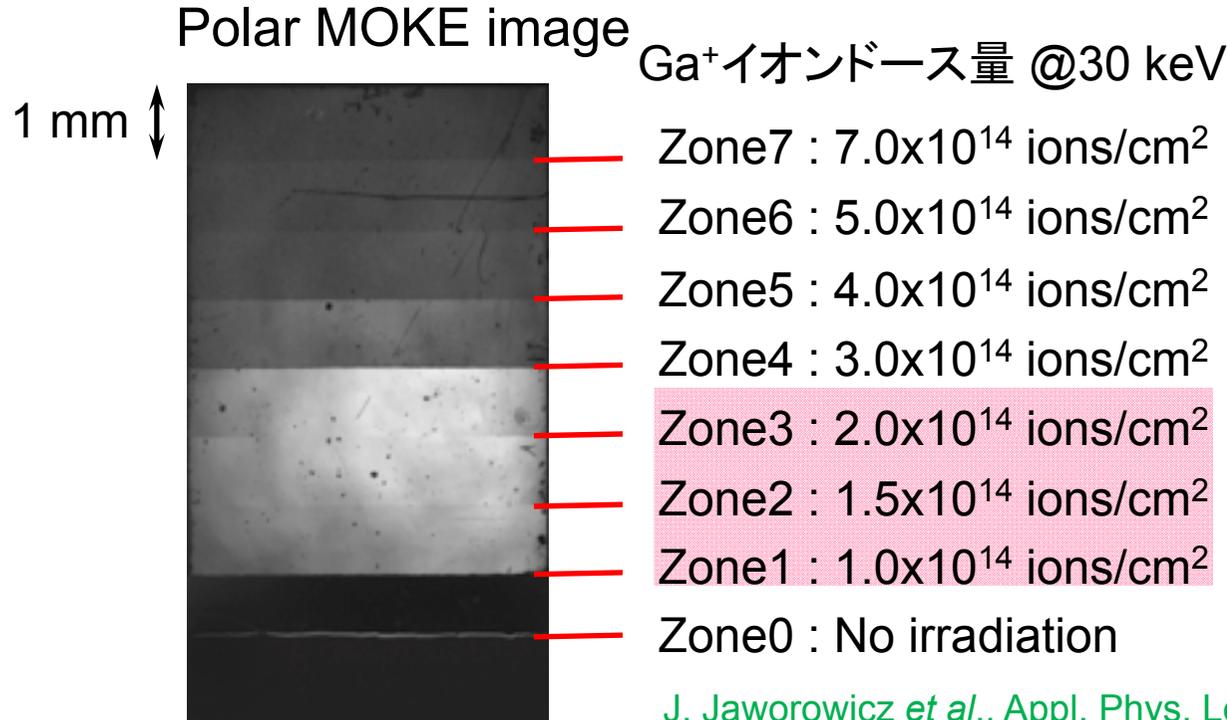
(2) Pt/Co/Pt薄膜へのGa⁺打ち込みによる面直磁化発現

現在進行しつつあるテーマ

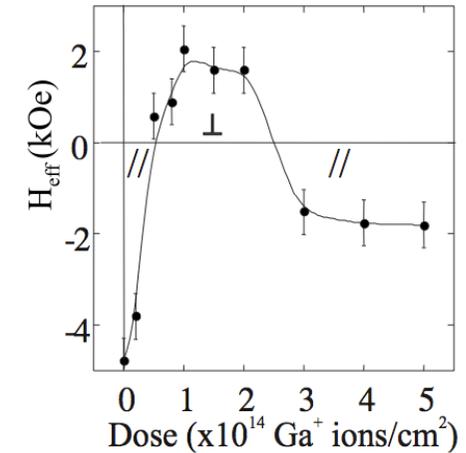
反強磁性FeMnと強磁性Niの界面磁気異方性

イオン照射による磁気異方性の制御

Pt(3.5 nm)/Co(2.4 nm)/Pt(4.5 nm)薄膜



Effective anisotropy field

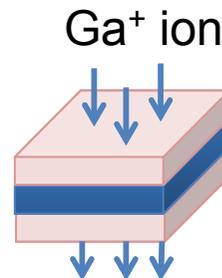


垂直磁化

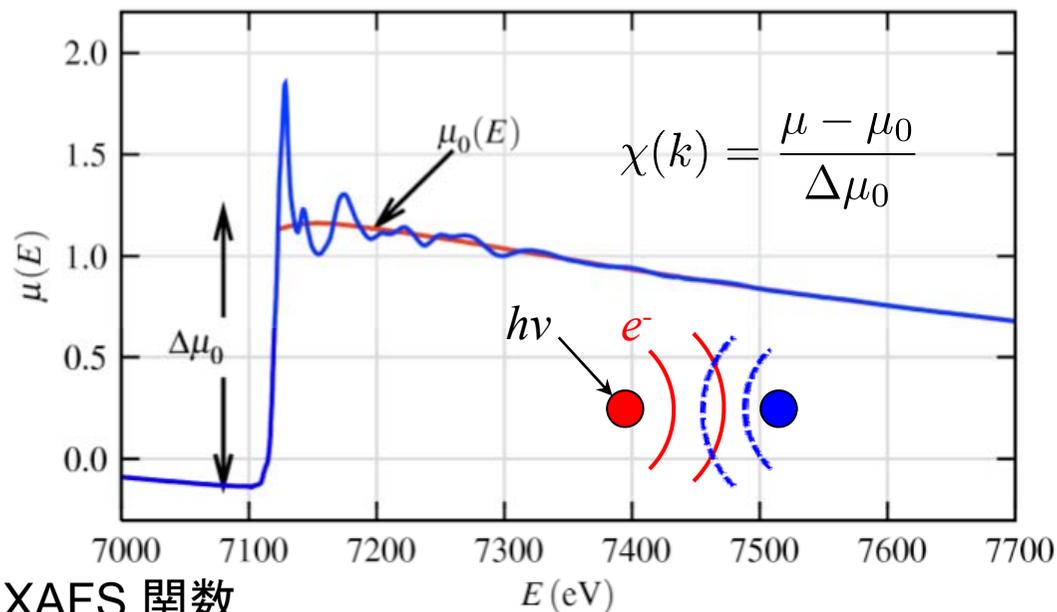
J. Jaworowicz *et al.*, Appl. Phys. Lett. **95**, 22502 (2009).

垂直磁気異方性の起源は？

- Co-Pt intermixing
 - 構造歪み
- ⇒ EXAFSによる構造解析



広域X線吸収微細構造 (Extended X-ray Absorption Fine Structure)



K-edge EXAFS 関数

$$\chi(k) = \sum_i S_0^2 \frac{N_i F_i(k_i)}{k_i r_i^2} e^{-2k_i^2 \sigma_i^2} e^{-2r_i / \lambda_i(k)} \sin(2k_i r_i + \phi_i(k_i))$$

得られる構造パラメータ

N : 配位数

r : 原子間距離

σ^2 : デバイ・ワラー因子

理論計算により決定されるパラメータ

$F(k)$: 散乱振幅

$\phi(k)$: 位相シフト

$\lambda(k)$: 平均自由行程

S_0 : 減衰因子

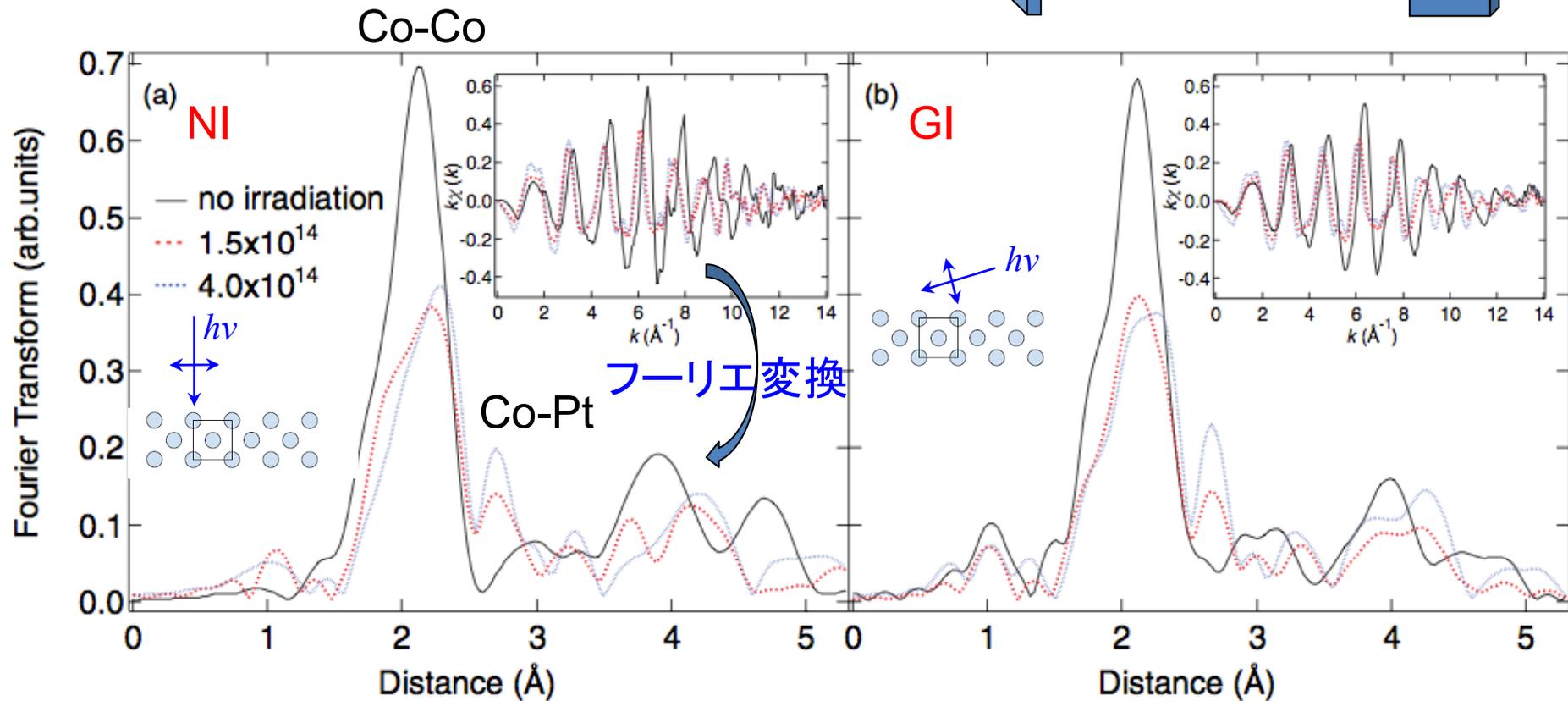
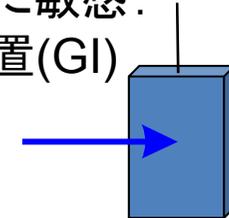
Co周りの局所構造：動径分布関数

測定：PF BL-12C
20 K, 19素子SSD検出器

面内方向に敏感：
直入射配置(NI)

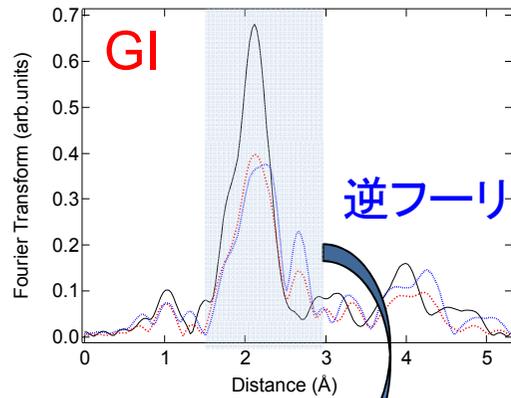


面直方向に敏感：
射入射配置(GI)



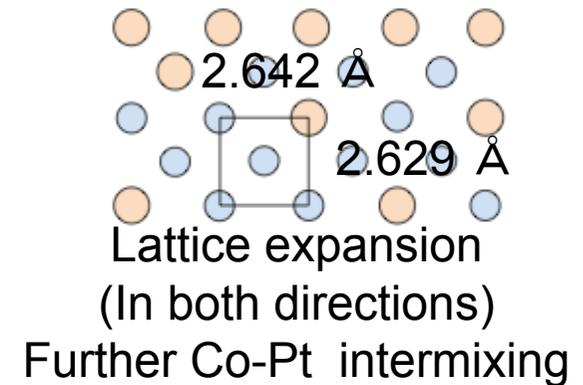
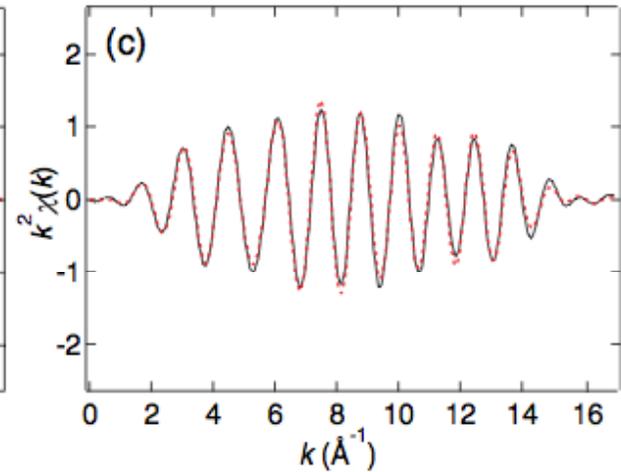
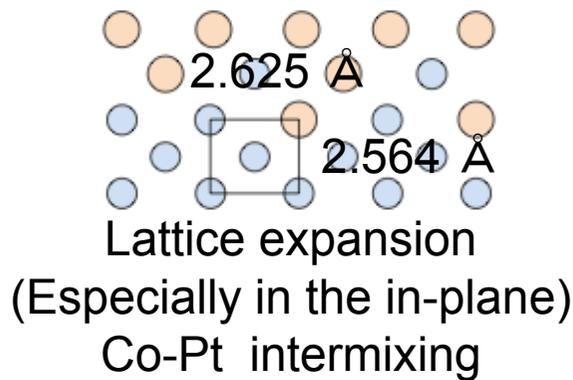
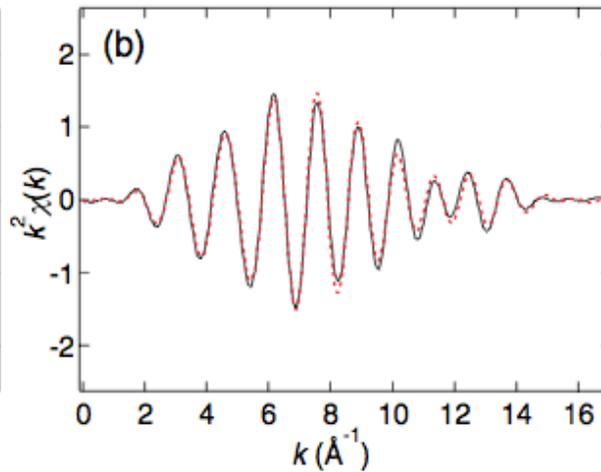
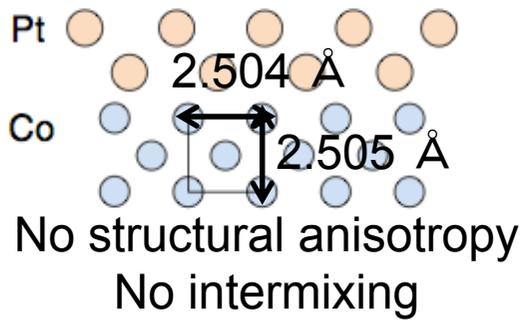
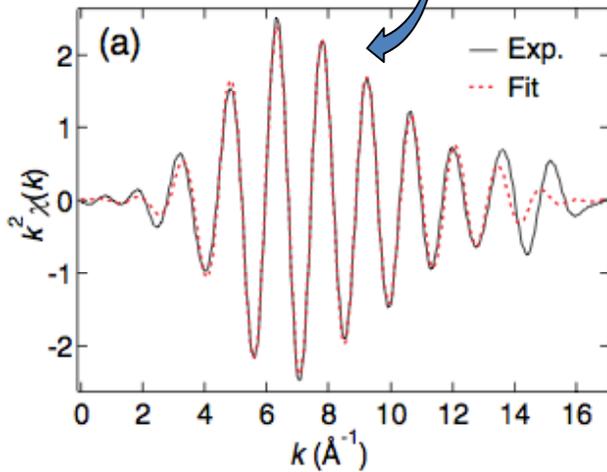
$$\chi(k) = \sum_i S_0^2 \frac{N_i F_i(k_i)}{k_i r_i^2} e^{-2k_i^2 \sigma_i^2} e^{-2r_i / \lambda_i(k)} \sin(2k_i r_i + \phi_i(k_i))$$

Curve Fit結果



逆フーリエ変換(最近接Co-Co, Co-Pt bond抜き出す)

(a) 0, (b) 1.5×10^{14} , (c) 4.0×10^{14} ions/cm²



面内方向の歪みが垂直磁気異方性を誘起？

磁気弾性エネルギーの見積り

Hexagonal, Lowest order of the strain

$$K_{ME} = (B_1 + 2B_3)\varepsilon_{11} + B_2\varepsilon_{33}$$

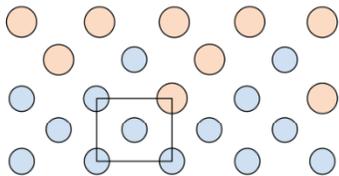
Bulk Co hcp Magneto-elastic constant B

$$B_1: -0.80 \times 10^7 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$B_2: -2.90 \times 10^7 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$B_3: 2.81 \times 10^7 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$$

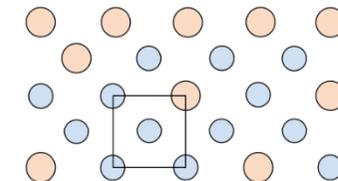
1.5×10^{14} ions/cm²



磁気弾性エネルギー

$$2.0 \times 10^6 \text{ J/m}^3 > 1.2 \times 10^6 \text{ J/m}^3$$

4.0×10^{14} ions/cm²

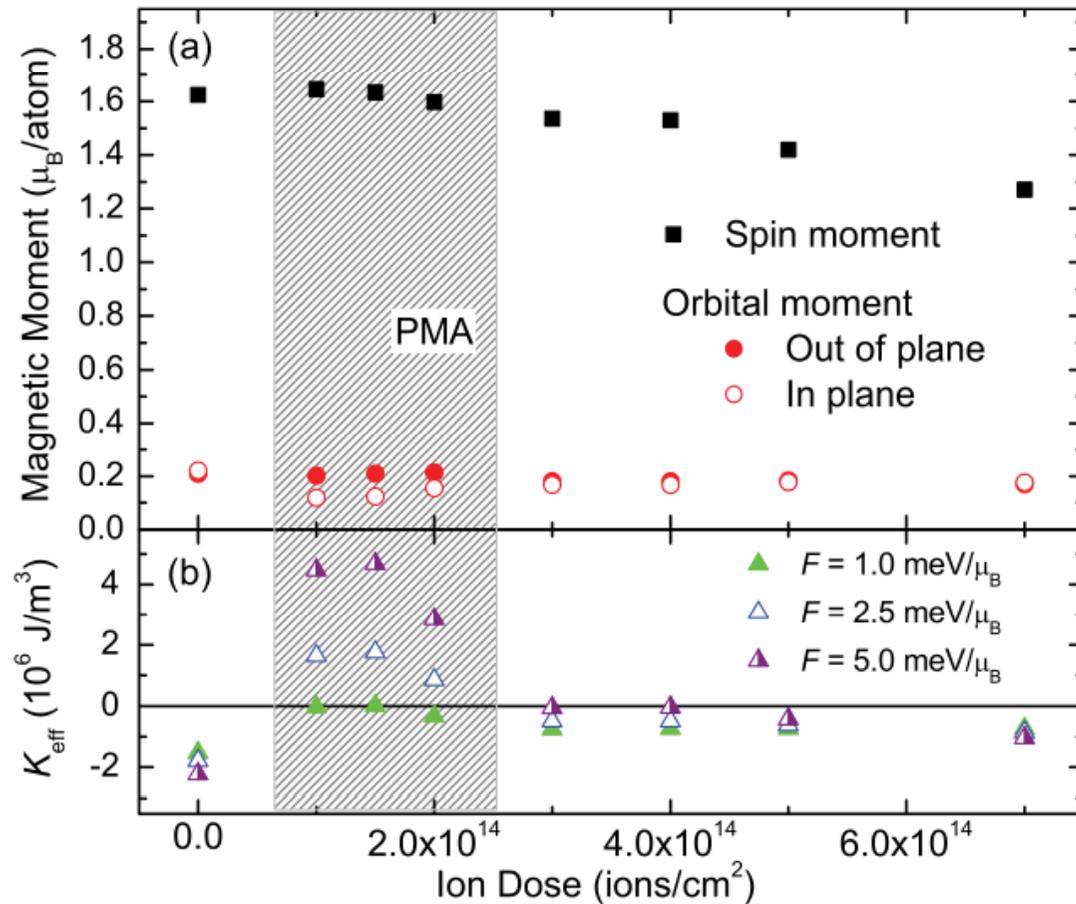


(形状磁気異方性エネルギー: $-2\pi M^2 = -1.2 \times 10^6 \text{ J/m}^3$)

面内歪みによる磁気弾性効果によって垂直磁化が誘起された

M. Sakamaki, K. Amemiya, et al., Phys. Rev. B **86**, 024418 (2012).

XMCDの結果との比較



磁気異方性エネルギーの見積り

$$K_{\text{eff}} = -2\pi M^2 + F(m_l^\perp - m_l^\parallel)$$

M : 飽和磁化

F : 比例定数

J. Stohr, J. Magn. Magn. Mater. **200**, 470 (1999), H. Abe *et al.*, J. Magn. Magn. Mater. **302**, 86 (2006).

⇒ $F=0.7$ to 50 meV/μ_B

M. Sakamaki, K. Amemiya, et al., Phys. Rev. B **86**, 024418 (2012).

最近の成果から

(1) FeNi多層膜の構造と磁気異方性

(2) Pt/Co/Pt薄膜へのGa⁺打ち込みによる面直磁化発現

現在進行しつつあるテーマ

反強磁性FeMnと強磁性Niの界面磁気異方性

FeMn/Niの磁性

J. Wu et al., Phys. Rev. B
79 (2009) 212411.

Ni spin switching induced by magnetic frustration in FeMn/Ni/Cu(001)

J. Wu,¹ J. Choi,¹ A. Scholl,² A. Doran,² E. Arenholz,² Chanyong Hwang,³ and Z. Q. Qiu¹
¹Department of Physics, University of California–Berkeley, Berkeley, California 94720, USA
²Advanced Light Source, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California 94720, USA
³Division of Advanced Technology, Korea Research Institute of Standards and Science, 209 Gajeong-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 305-340, Korea

(Received 27 March 2009; published 25 June 2009)

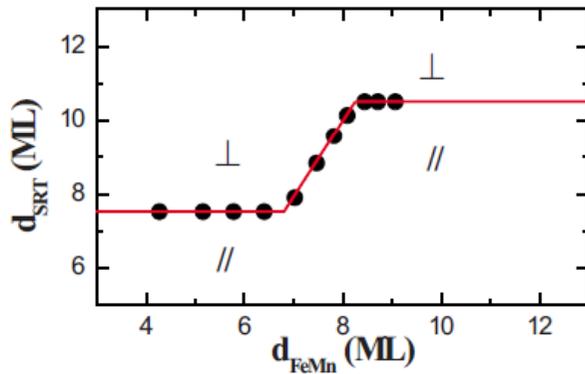


FIG. 3. (Color online) The Ni-SRT critical thickness d_{SRT} as a function of d_{FeMn} . The red solid line is guide to eyes. The antiferromagnetic order of the FeMn film above 7.5 ML generates a magnetic anisotropy to increase the Ni-SRT thickness from 7.5 to 10.5 ML.



面内磁化領域が広がる

保磁力が大きくなる

※ Ni/Cu(100)の磁気異方性

面内 → 面直 → 面内
7-11 ML 35-50 ML

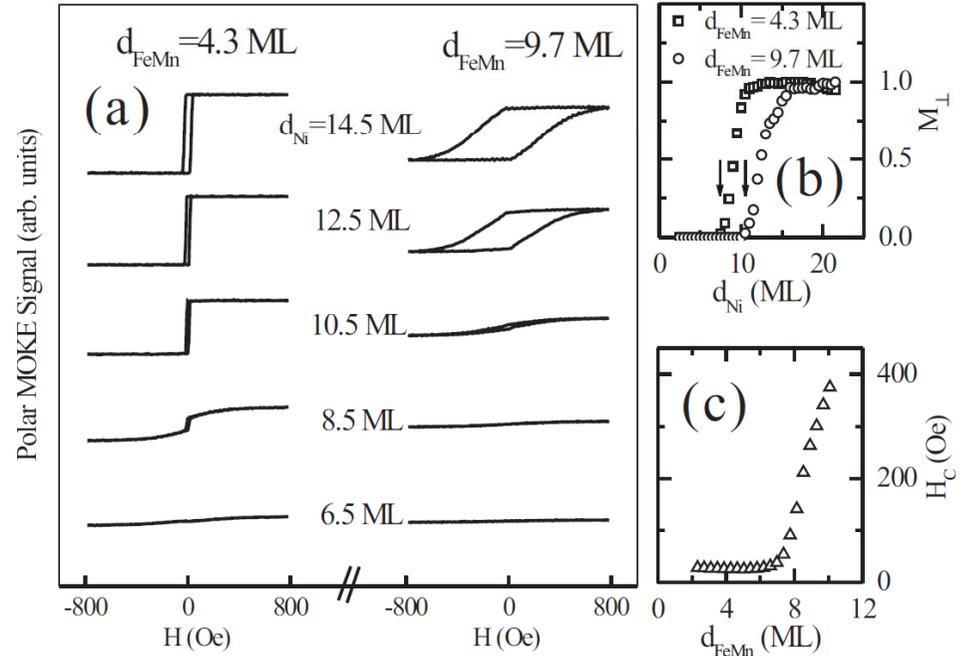


FIG. 4. (a) Polar MOKE hysteresis loops of FeMn/Ni/Cu(001) as a function of Ni thickness for paramagnetic FeMn overlayer (left column, $d_{\text{FeMn}}=4.3$ ML) and antiferromagnetic FeMn overlayer (right column, $d_{\text{FeMn}}=8.4$ ML). (b) The Ni polar remanence as a function of Ni film thickness. Arrows indicate the Ni-SRT thickness. (c) The coercivity of FeMn/Ni(14.5ML)/Cu(001) as a function of the FeMn film thickness.

研究の目的

FeMnによる磁気異方性変化の起源を探る

Niの界面電子状態の変化？
※ Ni表面は元来、強い面内志向

FeMnのスピンとの相互作用？

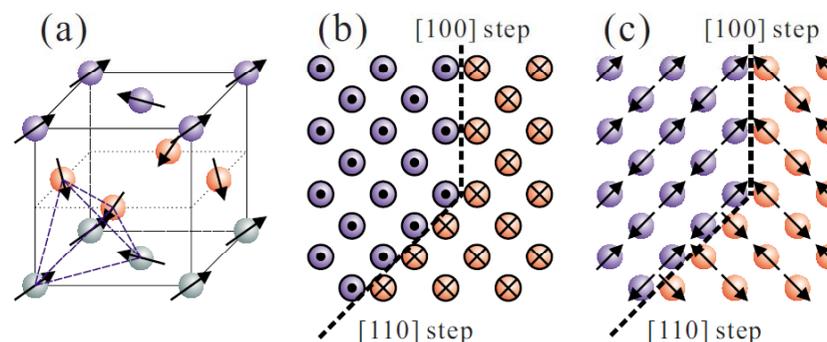
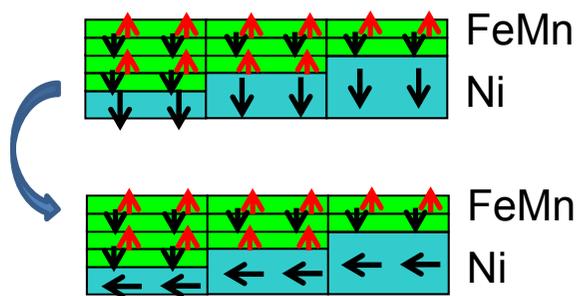
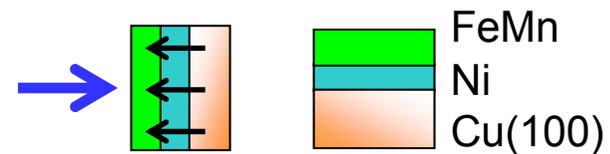


FIG. 5. (Color online) (a) the schematic drawing of 3Q-like FeMn spin structure. Arrows represent the spin orientation. Atoms are painted in three different colors to indicate different (001) planes. The dashed lines in (a) show the tetrahedral unit cell. (b) The out-of-plane, and (c) in-plane FeMn spin components at a (001) island with [100] and [110] steps. The net out-of-plane spin component is nonzero but alternates its direction between neighboring terraces (indicated by dot and cross at the center of atoms). The in-plane spin component has a nonzero net spin only at the [100]-type step edges.

J. Wu et al., Phys. Rev. B 79 (2009) 212411.

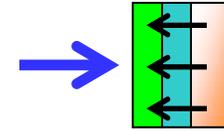
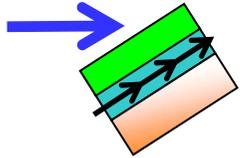
⇒ 深さ分解XMCD法によって、界面の磁気状態を調べる

Niに対する深さ分解XMCD測定 (面直磁化)

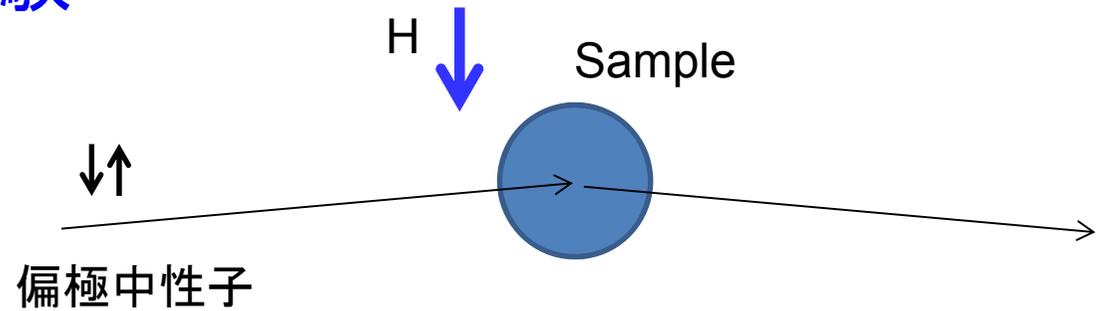
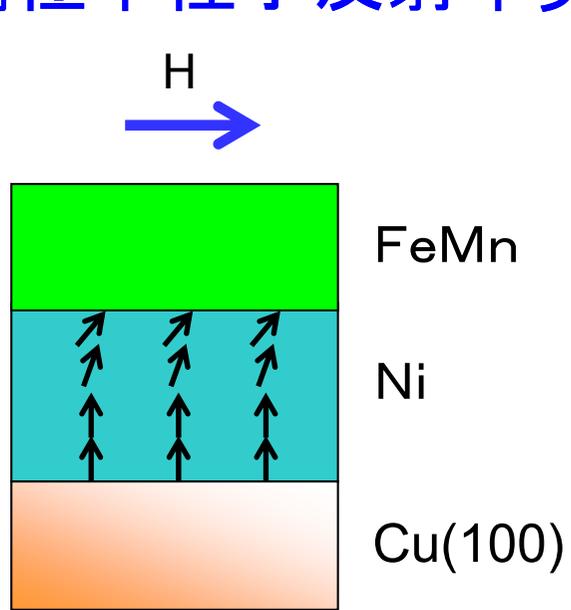


面内磁化と面直磁化の比較

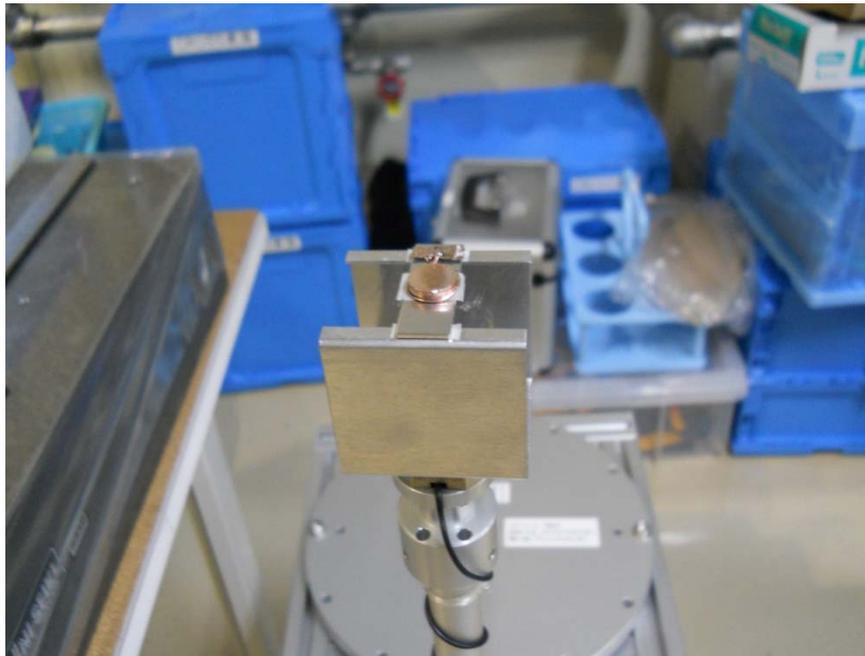
FeMn
Ni
Cu(100)



偏極中性子反射率実験



面直磁化のFeMn/Ni/Cu(100)に面内方向に磁場を印加することで界面付近の面内磁化成分を観察したい



まとめ

磁性薄膜の表面・界面における、結晶構造、電子状態、磁気状態の決定

最近の成果から

- (1) FeNi多層膜の構造と磁気異方性
- (2) Pt/Co/Pt薄膜へのGa⁺打ち込みによる面直磁化発現

現在進行しつつあるテーマ

反強磁性FeMnと強磁性Niの界面磁気異方性

放射光利用

- ・配置・角度依存XMCD (5 T, 5 K)
- ・深さ分解XMCD
- ・偏光スイッチング ⇒ 利用開始
- ・簡易XMCD (1.2 T, 30 K) ⇒ 定常運転

中性子利用

- ・偏極中性子反射率(J-PARC BL-17)
⇒ 定期的に実験を実施

ミュオン利用

- ・超低速ミュオン利用へ向けて準備中

2012年度の主な成果

ホイスラー合金/MgO界面: S.Tsunegi, K.Amemiya, M.Sakamaki et al., Phys. Rev. B, 85 (2012) 180408(R).
Ga⁺照射Pt/Co/Ptにおける垂直磁化発現: M.Sakamaki, K.Amemiya et al., Phys. Rev. B 86 (2012) 024418.
ホイスラー合金/MgO界面磁性の組成依存性: V.R.Singh, A.Fujimori et al., Phys. Rev. B 86 (2012) 144412.
Fe/Ni薄膜の構造と磁気異方性: M.Sakamaki and K.Amemiya, Phys. Rev. B 87 (2013) 014428.